

# CALIBRACIÓN DE CABEZAS DE IMPEDANCIA

Ruiz A. y Rasmussen K.\*

CENAM, División de Vibraciones y Acústica, Laboratorio de Patrones de Transferencia

Km. 4,5 Carr. a los Cués Mpio. El Marqués, Querétaro

Tel: (4) 2110500 Ext. 3577, fax: (4) 2110553, [arruiz@cenam.mx](mailto:arruiz@cenam.mx)

Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Ingeniería Mecánica

\*Technical University of Denmark, Department of Acoustic Technology, Danish Primary Laboratory on Acoustics  
DK-2800 Lyngby, Denmark

Tel: (45) 45 25 3937, [kras@dat.dtu.dk](mailto:kras@dat.dtu.dk)

## Resumen:

Se presentan los resultados obtenidos en la calibración de una cabeza de impedancia B&K 8000 realizada en las instalaciones del Departamento de Tecnología Acústica de la Universidad Técnica de Dinamarca. Se analiza el método utilizado para la determinación de la masa sísmica de la cabeza y la determinación de la sensibilidad de la impedancia. Se comparan los resultados de la determinación de las sensibilidades en aceleración y en fuerza de la cabeza de impedancia utilizando como referencia un acelerómetro patrón B&K 8305 y un transductor de fuerza B&K 8200. Las mediciones muestran mejores resultados al utilizar como referencia un acelerómetro patrón, esto es, se encuentra un intervalo lineal mayor tanto en la sensibilidad en fuerza como en aceleración respecto a los resultados obtenidos al utilizar como referencia un transductor de fuerza.

## INTRODUCCION

La impedancia mecánica en un punto se define como la relación entre la fuerza aplicada y la velocidad resultante en la dirección de la fuerza.

El trabajo se divide en dos partes. La primera describe el método para la calibración de cabezas de impedancia utilizando un transductor de fuerza como referencia y la segunda parte describe el método utilizando un acelerómetro patrón de referencia.

Se determina la impedancia mecánica y se realiza una estimación de la masa sísmica de la cabeza de impedancia bajo calibración. Se determina su sensibilidad en fuerza y en aceleración utilizando diferentes transductores como patrón de referencia.

## ANÁLISIS DE LA CABEZA DE IMPEDANCIA

La cabeza de impedancia bajo estudio es un transductor diseñado para realizar mediciones de impedancia mecánica basado en un acelerómetro y un transductor de fuerza combinados en una sola unidad. La construcción básica de una cabeza de impedancia B&K 8000 se muestra en la figura 1.

La cabeza de impedancia es un transductor de vibraciones utilizado para la calibración de acopladores mecánicos tales como un mastoide artificial el cual a su vez se utiliza para la calibración de vibradores óseos utilizados para mediciones audiométricas por vía ósea.

Para este propósito, en la calibración de la cabeza de impedancia sólo es necesario determinar su impedancia, la estimación de su masa sísmica y su sensibilidad en fuerza, a pesar de que en uno de los

métodos descritos en el trabajo también se determina su sensibilidad en aceleración.

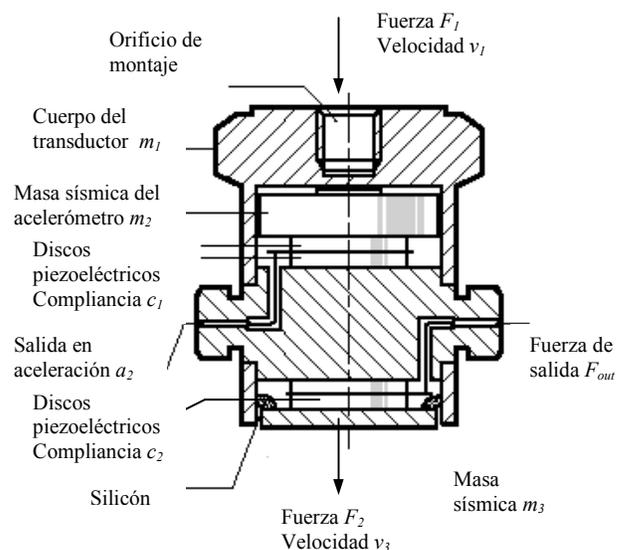
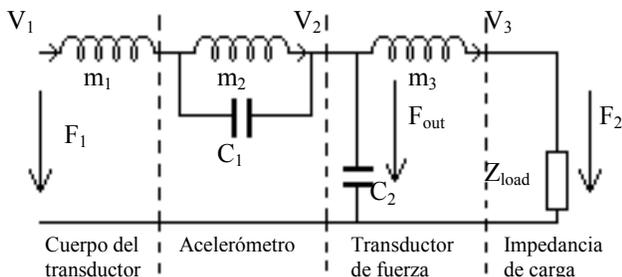


Figura 1. Dibujo esquemático de una cabeza de impedancia B&K modelo 8000

El transductor se monta sobre un excitador, el cual aplica una fuerza  $F_1$  resultando en una velocidad  $v_1$ . El acelerómetro mide la aceleración del cuerpo del transductor, el cual a bajas frecuencias se considera como un cuerpo rígido y el transductor de fuerza mide el flujo de la fuerza a través de la masa sísmica  $m_3$  hacia la impedancia de carga del transductor.

El modelo de la figura 2 muestra los parámetros del transductor, válido únicamente para su modo básico de operación despreciando todas las oscilaciones del transductor diferentes a la dirección longitudinal. Las

dos cantidades de medición son la fuerza  $F_{out}$  a través de la compliancia  $c_2$  y la aceleración  $a_2 = j\omega v_2$  de la masa sísmica  $m_2$  del acelerómetro. Para la calibración del mastoide artificial las dos cantidades de interés son, la impedancia mecánica del dispositivo y la fuerza transmitida al mismo.



**Figura 2. Modelo de una cabeza de impedancia B&K modelo 8000**

De la figura 2 encontramos que:

$$Z_{load} = \frac{F_2}{v_3} = \frac{F_{out} - j\omega m_3 v_3}{v_3} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{Z_{load}}{Z_{load} + j\omega m_3} F_{out} \quad (2)$$

Sin embargo, la velocidad  $v_2$  (obtenida a partir de derivar la aceleración  $a_2$ ) solamente es igual a la velocidad  $v_3$  a bajas frecuencias. De acuerdo con el fabricante la frecuencia de resonancia del acelerómetro es de aproximadamente 38 kHz lo cual resulta en un incremento de sensibilidad a altas frecuencias. Por lo tanto, para las frecuencias manejadas en la calibración de la cabeza de impedancia esto puede ser despreciado y de esta manera la velocidad medida a la salida de la cabeza (en forma de aceleración) representa la velocidad aplicada al transductor de fuerza. El transductor de fuerza tiene una resonancia de aproximadamente 70 kHz pero ésta depende fuertemente de la impedancia de carga. Un valor típico de  $m_3$  es de aproximadamente 1,3 gramos y por lo tanto una masa de carga de unos 130 gramos resultará en una resonancia de aproximadamente 7 kHz. Debido a esta frecuencia de resonancia, podemos asegurar que las mediciones de fuerza  $F_{out}$  serán correctas hasta una frecuencia cercana a 5 kHz.

La cabeza de impedancia B&K modelo 8000 está específicamente diseñado para la calibración de mastoides artificiales como se especifica en IEC 60373 y por lo tanto, la calibración del transductor debe realizarse en condiciones tan cercanas como sea posible a las condiciones de uso. De acuerdo al manual del fabricante, la impedancia del mastoide

corresponde a una masa de aproximadamente 1,2 gramos arriba de 3 kHz y una compliancia de aproximadamente  $2,5 \times 10^{-6}$  m/N; comparado con los valores típicos de  $m_3$  de 1,3 gramos y de  $c_2$  de  $4 \times 10^{-9}$  m/N podemos esperar que el error introducido por la cabeza de impedancia causado por el cambio en la frecuencia de resonancia a altas frecuencias puede ser arriba de 1 dB en 10 kHz cuando se calibra un mastoide artificial.

Bajo estas circunstancias las compliancias de los discos piezoeléctricos  $c_1$  y  $c_2$  pueden despreciarse y por lo tanto tenemos,

$$a_2 = j\omega v_2 \cong j\omega v_3 \quad (3)$$

Ahora, las ecuaciones (1) y (2) pueden escribirse como,

$$Z_{load} = \frac{F_2}{v_3} \cong j\omega \left( \frac{F_{out}}{a_2} - m_3 \right) \quad (4)$$

$$F_2 = F_{out} - j\omega m_3 v_3 \cong F_{out} - m_3 a_2 \quad (5)$$

Estas ecuaciones muestran que una correcta determinación de la impedancia de carga  $Z_{load}$  y de la fuerza transmitida  $F_2$  requiere que las mediciones de fuerza  $F_{out}$  y de aceleración  $a_2$  sean corregidas por la influencia de la masa sísmica  $m_3$ . Por lo tanto, la calibración de la cabeza de impedancia debe incluir también la estimación de la masa sísmica  $m_3$ .

## DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA Y DE LA MASA SÍSMICA

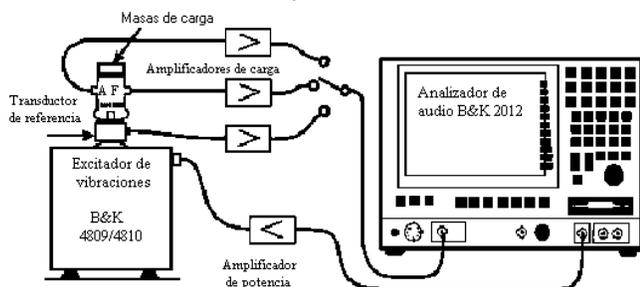
Para determinar la impedancia de la cabeza solamente es necesario conocer la relación entre la fuerza y la aceleración de salida de la cabeza bajo estudio. Los transductores piezo-eléctricos de las salidas en aceleración y en fuerza se conectan a amplificadores de carga. Cuando la cabeza se carga con masas conocidas  $m_{load}$  la ecuación (4) puede escribirse como,

$$\left( \frac{F_{out}}{a_2} \right) = \left( \frac{Z_{load}}{j\omega} \right) + m_3 = m_{load} + m_3 \quad (6)$$

Se utilizan diferentes masas de carga. La pendiente de un análisis de regresión lineal entre la relación fuerza/aceleración contra las masas de carga representa la impedancia de la cabeza  $S_{imp,8000}$  en términos de la fuerza dividida por la aceleración (impedancia en aceleración o masa aparente) y con la intercepción de esta pendiente en el origen con cero estimamos la masa sísmica  $m_3$ .

El arreglo de las conexiones para las mediciones se muestra en la figura 3. En este caso se utilizaron como referencia, un acelerómetro patrón B&K 8305 y un transductor de fuerza B&K 8200, se notan

diferencias importantes entre ambos métodos que serán observadas en la presentación de resultados.



**Figura 3. Arreglo para la calibración de cabezas de impedancia utilizando un transductor como referencia**

### DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN FUERZA Y ACELERACIÓN

La determinación de la sensibilidad de la cabeza de impedancia tanto en fuerza como en aceleración sólo puede realizarse utilizando un transductor como referencia. A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas al utilizar primeramente un transductor de fuerza y posteriormente un acelerómetro patrón.

#### MÉTODO DE CALIBRACIÓN UTILIZANDO UN TRANSDUCTOR DE FUERZA COMO REFERENCIA

El arreglo de las conexiones para las mediciones se muestra en la figura 3. El transductor de referencia utilizado es un transductor de fuerza B&K 8200. Para determinar la sensibilidad de la cabeza de impedancia mediante este método, el transductor de fuerza se monta entre el excitador de vibraciones y la cabeza de impedancia y las masas de carga sobre la masa sísmica de la cabeza de impedancia.

La sensibilidad en fuerza se calcula utilizando la sensibilidad del transductor de fuerza, la masa sísmica estimada y la ganancia de los amplificadores de carga.

#### MÉTODO DE CALIBRACIÓN UTILIZANDO UN ACELERÓMETRO PATRÓN COMO REFERENCIA

Para esta calibración se utiliza el mismo arreglo mostrado en la figura 3, en este caso el transductor de referencia es un acelerómetro patrón B&K 8305. Con este método se determina tanto la sensibilidad en fuerza como la sensibilidad en aceleración de la cabeza de impedancia. Como en el caso anterior, el acelerómetro se monta entre el excitador de vibraciones y la cabeza de impedancia y las masas de carga sobre la masa sísmica de la cabeza de impedancia.

La sensibilidad en aceleración se obtiene en forma directa por comparación con la sensibilidad del acelerómetro patrón y la sensibilidad en fuerza mediante la sensibilidad de la impedancia y la sensibilidad en aceleración.

## RESULTADOS

### MEDICIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LA IMPEDANCIA Y ESTIMACIÓN DE LA MASA SÍSMICA

Las mediciones se realizan mediante un programa basado en BASIC en el intervalo de frecuencias de 100 Hz a 10 kHz. Los resultados de cada serie son el promedio de cinco mediciones hechas mediante un barrido en todo el intervalo de frecuencias en pasos de 1/12 de octava, midiendo las dos señales de salida secuencialmente y calculando la relación de las dos señales.

Las mediciones se realizan a un nivel de aceleración de 10 a 15 m/s<sup>2</sup>. Todos los amplificadores de carga se ajustan para tener la misma ganancia. El transductor de referencia se monta bajo la cabeza de impedancia utilizando una película delgada de cera de abeja.

Los resultados comparativos de la sensibilidad de la impedancia entre los transductores de referencia utilizados se muestran en la tabla 1, en donde se muestra el promedio de las cinco de series de mediciones descritas anteriormente en el intervalo de frecuencias de 300-1000 Hz. En la tabla 2 se muestran los mismos resultados para la estimación de la masa sísmica.

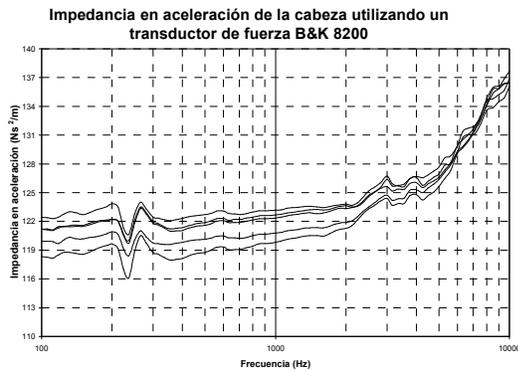
Resultado	Transductor de fuerza B&K 8200	Acelerómetro patrón B&K 8305
Impedancia (F/a Ns <sup>2</sup> /m)	121,1	122,4
Dev. Est.	1,53	1,0

**Tabla 1. Promedio de la relación F/a de la cabeza de impedancia**

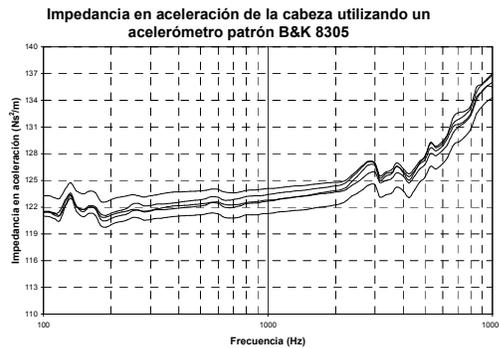
Resultado	Transductor de fuerza B&K 8200	Acelerómetro patrón B&K 8305
Masa sísmica (gr)	1,06	0,99
Dev. Est.	0,06	0,05

**Tabla 2. Promedio de la estimación de la masa sísmica de la cabeza de impedancia**

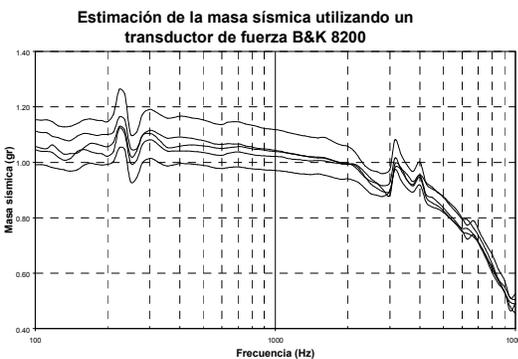
En las figuras 4 a la 7 se muestran las gráficas de los resultados mostrados en las tablas 1 y 2. En estas tablas se muestran los resultados de las cinco mediciones realizadas y con las cuales se realizaron los promedios.



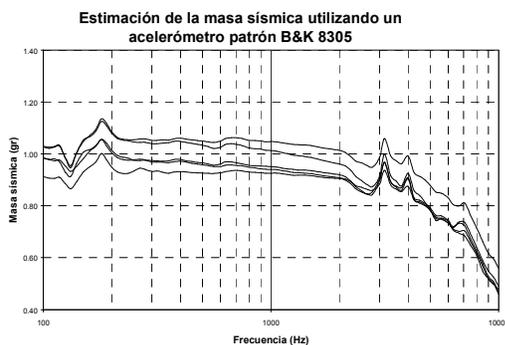
**Figura 4. Relación F/a de la impedancia utilizando un transductor de fuerza como referencia**



**Figura 5. Relación F/a de la impedancia utilizando un acelerómetro patrón como referencia**



**Figura 6. Masa sísmica utilizando un transductor de fuerza como referencia**



**Figura 7. Masa sísmica utilizando un acelerómetro patrón como referencia**

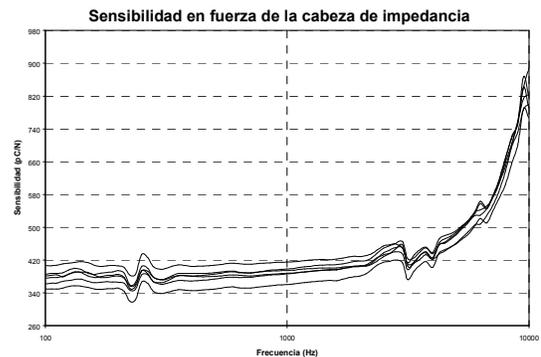
### DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN FUERZA UTILIZANDO UN TRANSDUCTOR DE FUERZA COMO REFERENCIA

Los resultados de la sensibilidad en fuerza utilizando como referencia un transductor de fuerza se muestran en la tabla 3 en donde se muestra el promedio de seis series de mediciones en el intervalo de frecuencias de 300-1000 Hz. Se observa que la desviación estándar de las mediciones es demasiado grande. El valor de sensibilidad del transductor de fuerza se tomó de su carta original de calibración considerándose constante en todo el intervalo de frecuencias.

Transductor utilizado	Sens. en fuerza (pC/N)
Transductor de fuerza B&K 8200	381,9
Desv. Est.	5,85

**Tabla 3. Sensibilidad en fuerza utilizando como referencia un transductor de fuerza**

En la figura 8 se muestra la gráfica de los resultados mostrados en la tabla 3.



**Figura 8. Sensibilidad en fuerza de la cabeza de impedancia utilizando un transductor de fuerza como referencia**

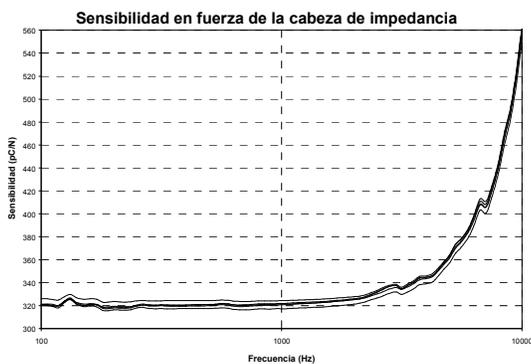
### DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN FUERZA Y EN ACELERACIÓN UTILIZANDO UN ACELERÓMETRO PATRÓN COMO REFERENCIA

Los resultados de la sensibilidad en fuerza y en aceleración utilizando como referencia un acelerómetro patrón se muestran en la tabla 4 en donde se muestra el promedio de cinco series de mediciones en el intervalo de frecuencias de 200-2000 Hz. Se observa que la desviación estándar es baja comparada con la obtenida al utilizar el transductor de fuerza. El valor de sensibilidad del acelerómetro patrón se tomó de su carta original de calibración considerándose constante en todo el intervalo de frecuencias.

Transductor utilizado	Sens. en fuerza (pC/N)	Sens. en aceleración (pC/m/s <sup>2</sup> )
Acelerómetro patrón B&K 8305	321,1	2,62
Desv. Est.	1,44	0,006

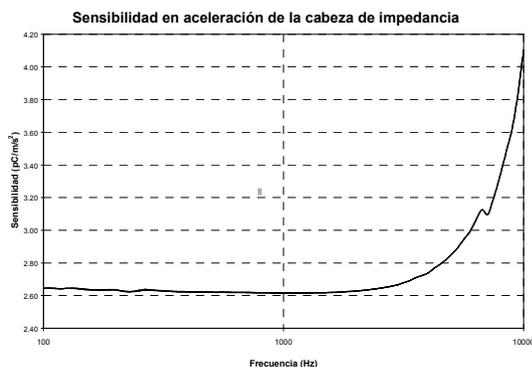
**Tabla 4. Sensibilidad en fuerza y en aceleración utilizando como referencia un acelerómetro patrón**

En la figura 9 se muestra la gráfica de los resultados de sensibilidad en fuerza para los datos mostrados en tabla 4. Se nota un intervalo lineal más grande, el cual es un resultado esperado. Además, a altas frecuencias el aumento en la sensibilidad no es tan alto como el obtenido utilizando el transductor de fuerza como referencia.



**Figura 9. Sensibilidad en fuerza de la cabeza de impedancia utilizando un acelerómetro patrón como referencia**

La figura 10 muestra los resultados de la sensibilidad en aceleración de la cabeza de impedancia de cinco series de mediciones. Cabe señalar que la gráfica parece mostrar sólo una serie de mediciones pero esto es debido a la buena repetibilidad de las mediciones que se manifiesta en una desviación estándar baja como la presentada en la tabla 4.



**Figura 10. Sensibilidad en aceleración de la cabeza de impedancia utilizando un acelerómetro patrón como referencia**

## CONCLUSIONES

Las mediciones realizadas con el acelerómetro patrón como referencia muestran mejores resultados en la determinación de la sensibilidad de la impedancia y en la estimación de la masa sísmica, así como en el cálculo de las sensibilidades en aceleración y fuerza de la cabeza de impedancia. Las desviaciones en los resultados son menores al 0,1 % para la sensibilidad en aceleración en todo el intervalo de 100 Hz a 10 kHz, excepto en algunas frecuencias arriba de 8 kHz donde las desviaciones se incrementan. Por otro lado, las desviaciones en la determinación de la sensibilidad en fuerza son menores al 1 %, sin embargo, en algunas frecuencias se encuentran desviaciones arriba de 1 %.

Las mediciones utilizando un transductor de fuerza como referencia pueden utilizarse como un método alternativo para determinar la sensibilidad en fuerza de la cabeza de impedancia pero la incertidumbre de la medición será demasiado grande.

Además, es necesario calibrar los amplificadores de carga y los transductores de referencia en todo el intervalo de medición debido a que éstos son una fuente de error importante en los cálculos.

## REFERENCIAS

- [1] K. Rasmussen, Calibration of artificial mastoids and impedance transducers. Report PL-15, 2000 DPLA/DAT/DTU.
- [2] IEC 60373 Mechanical coupler for measurements on bone vibrators
- [3] Manuales del fabricante de Mastoides Artificiales y Cabezas de Impedancia, Brüel and Kjaer.